

А. А. Соловьев [A. A. Solovyev]
А. М. Залиханов [A. M. Zalikhanov]
Д. А. Соловьев [D. A. Solovyev]
Л. А. Шилова [L. A. Shilova]

УДК 621.175.3:627.81
556.551.004.12

СИФОННЫЕ ВОДОЗАБОРНЫЕ СООРУЖЕНИЯ В ВОДОЕМАХ-ОХЛАДИТЕЛЯХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

THE SIPHON WATER INTAKE FACILITIES IN COOLING POND OF ELECTRIC POWER PLANTS

В статье выполнен анализ условий эффективного снижения температуры воды, выходящей из водоема воды с использованием щелевого водозаборника, работающего по принципу гидравлического сифона. Дана оценка эффективности использования сифонных щелевых водозаборников в системах охлаждения оборотной воды электростанций.

The analysis of the conditions of effectively reducing the temperature of the water coming from the reservoir using a slotted intakes and working on the hydraulic siphon principle are shown in the article. The estimation of efficiency using of gap siphon water-taps in the cooling systems of circulating water plants are made.

Ключевые слова: водоемы-охладители, водозаборные сооружения, термогидравлическое моделирование, эффективность охлаждения оборотной воды

Key words: reservoirs-coolers, water intakes, simulation of thermo hydraulic system, efficiency of cooling circulating water.

Необходимым условием работы электростанций с термодинамическим циклом производства электрической энергии является охлаждение конденсаторов турбин. Для отвода низкопотенциального тепла атомных и тепловых электростанций широко используются водоемы – охладители с градирнями, функционирующими по схеме оборотного водоснабжения [1, 2, 3]. Исследованиями последних лет установлено, что в летний период года не удается достигать необходимого охладительного эффекта циркуляционной воды, от которого зависит фактическая мощность электростанции [4, 5]. Причина – в снижении испарительного охлаждения с водной поверхности, на которой, как правило, одновременно располагаются водовыпускные и водозаборные сооружения [6]. Для преодоления эффекта испарительного недоохлаждения в жаркие и влажные периоды года в работе ставится задача обосновать такой выбор конструктивно компоновочных параметров водозаборных сооружений, который позволяет получать эффективное снижение температуры охлажденной циркуляционной воды, определяющей вакуум в конденсаторах и фактическую мощность электростанций. В качестве средства для решения этой задачи нами был использован метод термогидравлического моделирования с лабораторной моделью водоема – охладителя дополненного сифонным водозабором с щелевым затвором [7].

Для охлаждения циркуляционной воды в водоеме-охладителе традиционно используется способ, в котором выпуск теплой воды, ее охлаждение за счет естественных природных процессов и забор воды выполняется из верхнего поверхностного слоя водохранилища. Охлаждение воды внутри водоема происходит путем теплопередачи с поверхностного и придонного слоя. Выхолаживание свободной поверхности водоема осуществляется за счет передачи тепла окружающему воздуху в результате испарения воды. В придонном слое вода охлаждается за счет теплообмена с дном водоема. В процессе охлаждения воды в водоеме-охладителе возникает стратификация, при которой холодная вода оказывается в придонном слое, а теплая вода в поверхностном слое. Поскольку водовыпуск и водозабор осуществляется с поверхностного слоя водоема-охладителя, для большего понижения температуры воды в этом слое, стремятся увеличить время контакта теплого поверхностного слоя воды с наружным воздухом. С этой целью строят струнаправляющие дамбы, увеличивающие путь транзитной струи от места входа до места забора воды. Необходимого для штатной работы конденсаторов турбин охлаждения циркуляционной воды за счет пространственной интенсификации теплообмена с воздухом и испарения при высокой температуре и большой влажности воздуха, как правило, в этом случае не достигается.

Интенсификация степени охлаждения оборотной воды может быть получена за счет конструктивного заглубления уровня отбора воды в водозаборном сооружении. Для этого необходимо отгородить зону забора воды от остального объема водоема перегородкой. Верхний край перегородки должен быть расположен

выше уровня воды, а нижний край размещаться вблизи дна водоема, образуя просвет между перегородкой и дном, через который из придонного слоя в зону водозабора сможет поступать только холодная вода. Таким образом, водозабортное сооружение в этой конструкции представляет собой сифон с щелевым затвором, регулирующий объем придонной воды отбираемой водозабортным сооружением [7].

Для оценок эффективности охладительных функций конструкции сифонного водозабора были проведены экспериментальные исследования процессов теплообмена в модельном водоеме с запуском на его водную поверхность горячей и отбором с глубинных слоев охлажденной воды. Установка (рис. 1) включала в себя: контур горячей воды – для моделирования процесса подачи и охлаждения воды в водоёме; контур холодной воды – для имитации придонного охлаждения водоема; контрольно-измерительный комплекс.

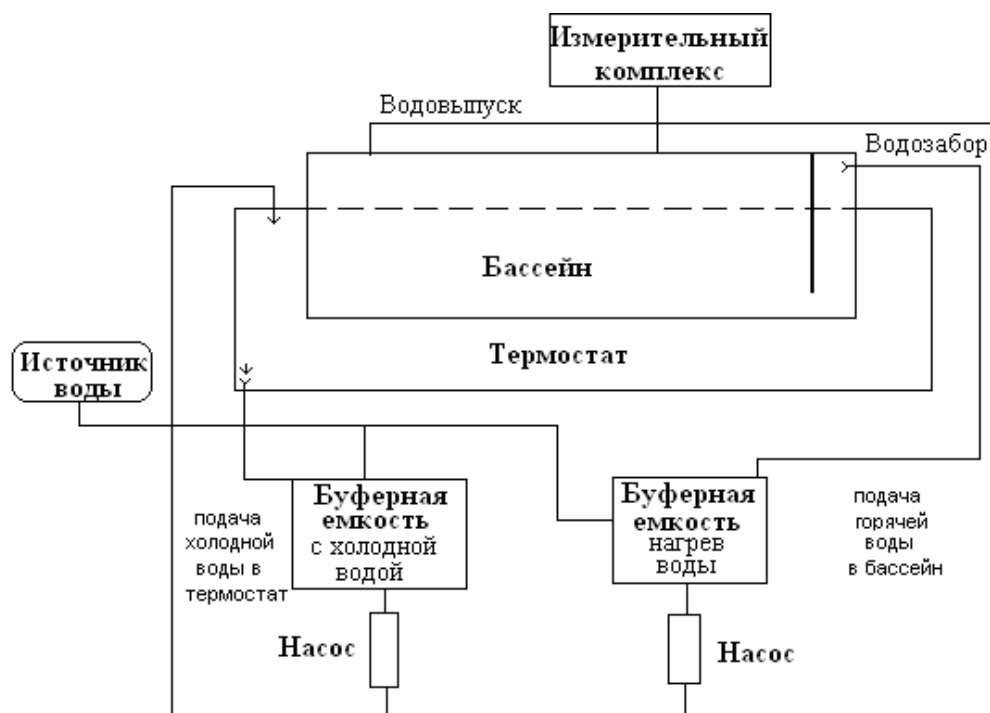


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки для исследования процессов теплообмена в физической модели водоема-охладителя

Замкнутый контур холодной воды состоит из: термостата (ёмкости, имитирующей температуру подстилающей поверхности бассейна-охладителя); буферной ёмкости с холодной водой; насоса для подачи холодной воды в термостат; трубопроводов с кранами.

В контрольно-измерительный комплекс входят следующие компоненты: датчики температуры; устройство сбора данных E 14-140 L-card с программным обеспечением; компьютер. Параметры модельного бассейна выбирались в относительном масштабе подобным натурному наливному водохранилищу на основе озера Лесное в пойме реки Дон [8] (табл. 1).

Таблица 1

Характерные параметры натурального водохранилища и модельного бассейна

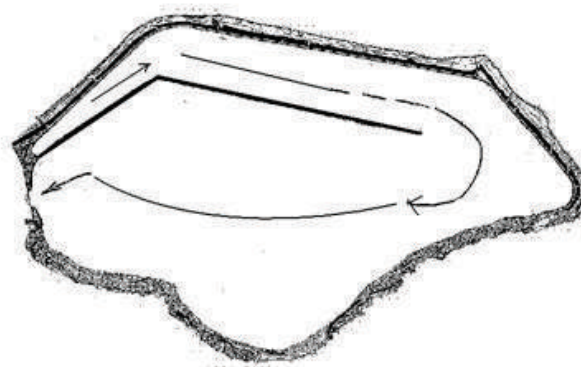
Параметры	Натурный водоем	Модельный бассейн
площадь водного зеркала ,м ²	4 900 000	1,5
объём воды, м ³	32 000 000	0,15
максимальная длина, м	3 500	1,5
максимальная ширина, м	1 900	1,0
площадь водного зеркала, м ²	3 890 000	1,0
средний расход сбрасываемой воды м ³ /с	50	0,0005
средняя глубина, м	6,5	0,1
температура горячей воды, °С	40	40
температура воды на выходе, °С	33	18
температура глубинной воды, °С	10	10

Модель водоема-охладителя объемом $(1,0 \times 0,8 \times 0,12) \text{ м}^3$, располагалась в термостатирующем бассейне объемом $(1,2 \times 1,0 \times 0,15) \text{ м}^3$ (рис.2). Между стенками бассейнов имелся зазор в 0,1 м. Образующееся между стенками бассейнов пространство заполнялось водой с заданной температурой, которая поддерживалась в процессе экспериментов постоянной. Эта вода предназначалась для имитации влияния дна и берегов водоема-охладителя на процесс передачи к воде, заполняющей модельный бассейн. Циркуляция воды в бассейне-термостате осуществлялась насосом, включенным в контур теплообменника. Необходимый уровень воды в обоих бассейнах поддерживался с помощью сливных шлангов перемещение открытых концов, которых по вертикали регулировалось, а начало каждого шланга имело соединение с дном соответствующего бассейна.

Модельный бассейн заполнялся горячей водой, которая поступала в него для охлаждения. Для соответствия орографии стенок модельного бассейна с очертаниями берегов реального водоема-охладителя, внутренняя часть бассейна была ограничена вкладкой из оргстекла в заданном масштабе, повторяющей береговую линию натурального водохранилища (рис. 2). Подача воды в модельный бассейн-охладитель осуществлялась через щелевой затвор в перегородке. Перемещение затвора в вертикальном направлении регулировалось, для имитации поступления воды из основной части бассейна в отгороженный сифонный отсек. Источник горячей воды, которая подавалась в модельный бассейн для охлаждения, находился в накопительной емкости. Температура воды в накопительной емкости поддерживалась терморегулятором, обеспечивающим включение и отключение нагревательного элемента. Подача воды из накопительной емкости в водовыпуск спуск осуществлялась шлангом, соединенным с насосом.



(а)



(б)

Рис. 2. Лабораторная модель бассейна-охладителя с орографической вкладкой и сифоном с щелевым затвором (а); контур границ натурального водохранилища (б)

Отбор воды охлаждаемой в модельном бассейне осуществлялся через щелевой водозаборник с регулируемой высотой придонного щелевого отверстия. Водозаборник закреплялся на вертикальной стойке, которая позволяла перемещать его по вертикали. При этом воду можно было забирать с разных горизонтов малого бассейна, в котором устанавливалась температурная стратификация по глубине. Вода через проем в затворе под действием гидростатического напора заполняла сифонный отсек бассейна. В этой части бассейна с помощью температурных датчиков измерялась температура охлаждаемой воды, которая направлялась на выходной водоспуск. Величина гидростатического напора регулировалась положением открытого конца сливного шланга, соединенного с сифонной емкостью бассейна. Расходы воды поступающей и отбираемой с модельного бассейна регулировались так, чтобы приток горячей воды соответствовал стоку охлаждаемой воды выходящей из сифонной емкости.

Для измерения температурных профилей по вертикали в разных частях малого бассейна термометрической линейке устанавливались температурные датчики, которые перемещались по горизонтали. Информация, от датчиков, измеряющих температуру, передавалась для дальнейшей обработки и накопления на компьютер. Помимо передвижной термометрической линейки в малом бассейне были установлены пять стационарных термометрических линеек. Они позволяли отслеживать значения температуры на разных уровнях по глубине на всем пути перемещения воды от входа до водоспуска.

В экспериментах с лабораторной моделью водоема-охладителя исследовалось влияние температурной стратификации на степень снижения температуры оборотной воды выходящей из водоема при водозаборе из сифонного отсека с щелевым затвором. Основная серия опытов выполнялась в условиях постоянного поступления и опорожнения модельного бассейна-охладителя и стационарным охлаждением воды в термостатирующем бассейне. Объем воды в бассейне-охладителя обеспечивался постоянным при сохранении глубины воды 0,1 м. Температура заполнения бассейна водой оставалась равной 40°C . Скорости подачи и забора воды в бассейн сохранялись равными при расходах $Q_{\text{вход}} = Q_{\text{выход}} = 0,1 \text{ л/с}$. В термостате вода имела

температуру 10 °С. Щель затвора в сифоне в процессе опытов изменялась, принимая значения от 0,01 м; до 0,1 м. В процессе экспериментов измерялась температура $T_{вход}$ на торце шланга подачи воды на поверхность бассейна-охладителя, $T_{выход}$ на шланге забора воды из сифонного отсека. А также температур расположенных в различных частях бассейна: T_1, T_2 , в бассейне-охладителе на поверхности воды в зоне струенаправляющего канала, T_3 в конце каналадалеепо всей площади бассейна T_4, T_5, T_6 , в том числе перед сифонным отсеком T_7, T_8, T_9 , и внутри отсека у водозаборного слива T_{10} (рис. 3).

В местах расположения обозначенных температурных датчиков измерялись также значения температур на различных глубинах. В процессе всех измерений в различные моменты времени фиксировались временные изменения температура воды $T(t)$ в термостатирующей емкости. Измерения проводились дискретно со скважностью через 10 с в интервале 5 мин. Картина теплосодержания поверхностного слоя водного зеркала бассейна регистрировалась тепловизором.

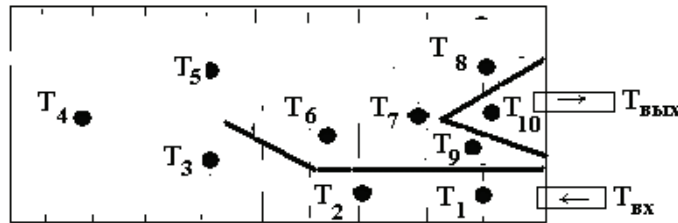


Рис. 3. Схема расположение датчиков температуры в лабораторном бассейне-охладителе с сифонным водозабором

В результате обработки данных опытных измерений были получены следующие результаты. При полностью открытом щелевом затворе в статическом состоянии воды бассейна профили температуры по вертикали в местах, обозначенных на рис. 3 свидетельствуют о практически единообразной форме распределения температуры с глубиной (рис. 4). Отмечается некоторая степень неравномерности теплообмена на границе вода-воздух. Участки, удаленные от входа воды в бассейн охлаждались в большей степени за счет более интенсивного испарения и бокового отъема тепла термостатом. При этом внутри сифона и вне его температура практически была одинаковой. Температуры на уровне водоспуска и водозабора отличались незначительно в пределах погрешности измерений. Температурное поле, зафиксированное тепловизором (рис. 5) подтверждало этот вывод.

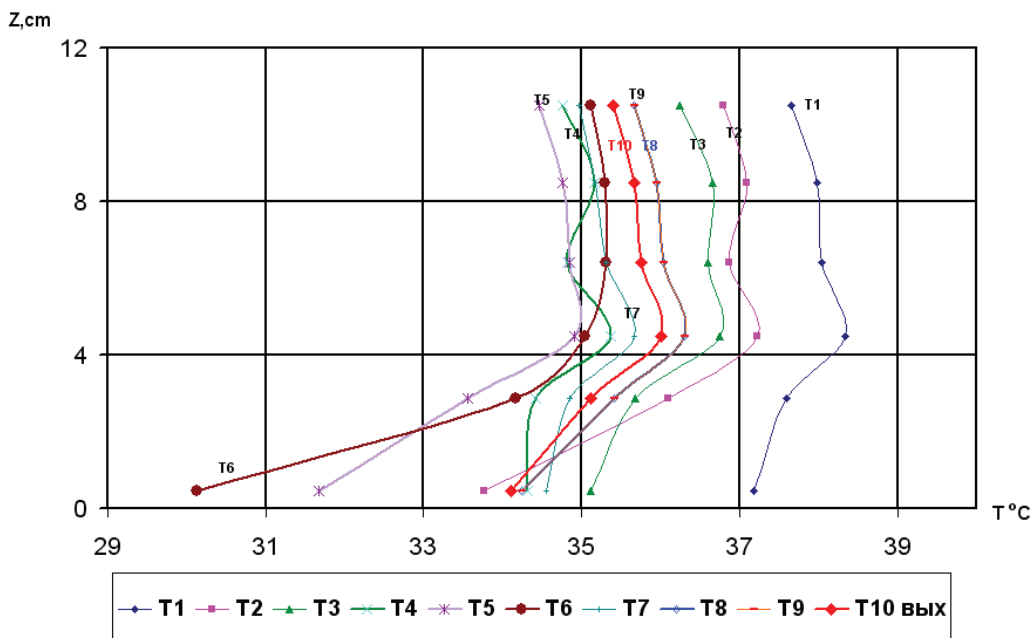


Рис. 4. Вертикальные профили температур в различных участках модельного бассейна с горячей, стоячей водой

В опытах с различной высотой подъема щелевого затвора, открывающего подход к водозабору охлажденной воды, профили температуры с глубиной заметно отличались на участках движения горячей воды в струенаправляющем канале, при подходе к сифону и внутри самого сифона, откуда забиралась охлажденная вода. Представленные на рис 6 вертикальные профили температур иллюстрируют степень различия температурных полей с горячей и холодной водой и размеров деятельного слоя термоклина с разными щелевыми проемами затвора.

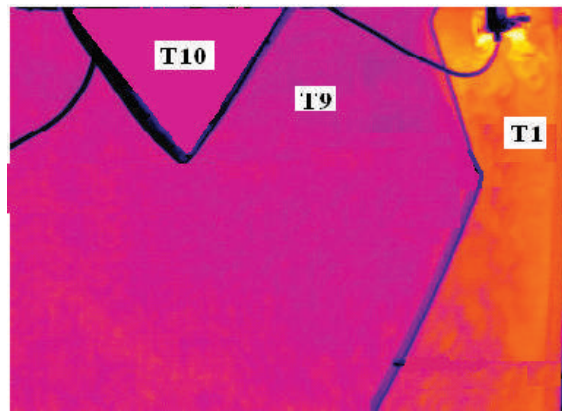


Рис. 5. Тепловизионный снимок температурного поля в бассейне с горячей стоячей водой. Окраска светлым тоном соответствует более высокой температуре

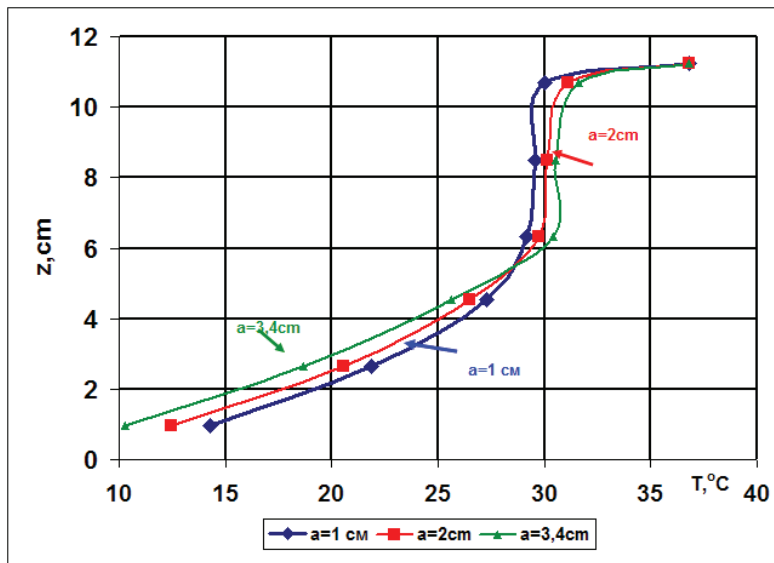


Рис. 6. Вертикальные профили температур внутри сифонного отсека под местом расположения водозаборного шланга при различных высотах открытия щелевого затвора

Об эффективности забора охлажденной воды с нижних горизонтов бассейна через ограничительный проем щелевого затвора сифонного отсека свидетельствуют итоговые результаты экспериментального моделирования (рис. 7).

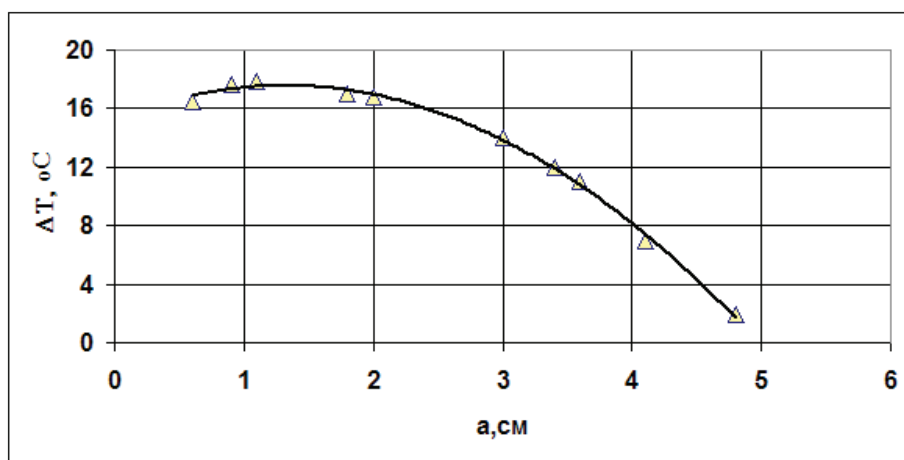


Рис. 7. Зависимость глубины охлаждения оборотной воды от высоты щелевого затвора в сифонном отсеке бассейна-охладителя

Наибольшее охлаждение достигается на относительно небольших проемах в щелевом затворе. До нижней границы термоклина эффект снижения температуры оборотной воды устойчиво проявляется. Выпол-

ненные в соответствии с уравнением теплового баланса расчеты по методике [9,10] как следует из рис. 7 находятся в удовлетворительном соответствии с данными наблюдений и подтверждают полученный вывод относительно предельных глубин, выше которых нецелесообразно производить отбор воды из бассейна-охладителя.

Заключение. Снижение температуры оборотной воды, поступающей в водохранилище для охлаждения по сравнению со штатным режимом, обеспечивает дополнительную выработку электрической энергии. Модельные эксперименты с водоемом-охладителем показали, что предлагаемый вариант регулирования температуры заборной воды с использованием гидротехнических затворов в сифонных отсеках, установленных в выходной части водохранилищ создает реальные условия для оптимизации температурного режима. Использование забора воды с глубинных слоев в случае модельных экспериментов позволяет достигать эффекта охлаждения до нескольких градусов, что дает основание для достижения роста генерации энергии в летнее время года без потерь, связанных с недоохлаждением из-за стратифицированного расслоения воды отбираемой с поверхности водохранилища.

ЛИТЕРАТУРА

1. Берман Л. Д. Испарительное охлаждение циркуляционной воды. Л., 1949. С. 63-70.
2. Hao-Tzu Lin, Jong-Rong Wang, Kai-Chun Huang, Chunkuan Shih, Show-Chyuan Chiang, Chia-Chuan Liu Issues and future direction of thermal-hydraulics research and development in nuclear power reactors// Nuclear Engineering and Design, 2013. Vol. 264. P. 3-23.
3. Sokolov A. S. Effect of hydraulic structures location on cooling capacity of cooling ponds. // Izvestia B. E. Vedeneev VNIIG. 2000. Vol. 236. P. 190-195.
4. Прянишников Ф. Д., Бейнер Н. В., Бейнер П. С. Анализ организации движения потока в водоемах охладителях АЭС// Энергетика. Известия высших учебных заведений из энергетических объединений СНГ, №1. 2014. С. 82-88
5. Saha P., Aksan N., Andersen J., Yan J., Simoneau J.P., Leung L., Bertrand F, Aoto K., Kamide H. Issues and future direction of thermal-hydraulics research and development in nuclear power reactors// Nuclear Engineering and Design .2013. Vol. 264. 2013. P. 3-23.
6. Антонова Л. Н., Канюк Г. И., Михайский Д. В., Омельченко Л. Н., Фокина А. Р. Натурное исследование водоемов-охладителей // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2012. Т. 6. Вып. № 8 (60). С. 42-46.
7. Соловьев А. А., Нигматулин Р. И., Чекарев К. В., Малых Ю. Б. Способ охлаждения циркуляционной воды в пруде-охладителе // Патент РФ №2541480, 13.02.2015.
8. Терентьев Н. Н., Шиманский Б. М. Эксплуатация водохранилищ-охладителей электростанций. М.: ОРГРЭС, 1970.
9. Макаров И. И. Моделирование гидротермических процессов водохранилищ-охладителей ТЭС и АЭС. М.: Энергоатомиздат, 1986. 184 с.
10. Методические указания по технологическим расчетам водоемов-охладителей, РД 153-34.2-21.144-2003, ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева». СПб., 2004. 55 с.

REFERENCES

1. Berman L. D. Isparitel'noe okhlazhdenie tsirkulyatsionnoy vody. L., 1949. s. 63-70.
2. Hao-Tzu Lin, Jong-Rong Wang, Kai-Chun Huang, Chunkuan Shih, Show-Chyuan Chiang, Chia-Chuan Liu Issues and future direction of thermal-hydraulics research and development in nuclear power reactors// Nuclear Engineering and Design, 2013. Vol. 264 P. 3-23.
3. Sokolov A. S. Effect of hydraulic structures location on cooling capacity of cooling ponds. // Izvestia B. E. Vedeneev VNIIG. 2000. Vol. 236. P. 190-195.
4. Pryanishnikov F. D., Beyner N. V., Beyner P. S. Analiz organizatsii dvizheniya potoka v vodoemakh okhladitelyakh AES // Energetika. Izvestiyavysshikhuchebnykhzavedeniyenergeticheskikhob»edineniySNG. №1. 2014. c. 82-88.
5. Saha P., Aksan N., Andersen J., Yan J., Simoneau J.P., Leung L., Bertrand F, Aoto K., Kamide H. Issues and future direction of thermal-hydraulics research and development in nuclear power reactors// Nuclear Engineering and Design. 2013. Vol. 264. 2013. P. 3-23.
6. Antonova L. N., Kanyuk G. I., Mikhayskiy D. V., Omel'chenko L. N., Fokina A. R. Naturnoe issledovanie vodoemov-okhladiteley // Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy. 2012. T. 6. Вып. № 8 (60). с. 42-46.
7. Solov'ev A. A., Nigmatulin R. I., Chekarev K. V., Malykh Yu. B. Sposob okhlazhdeniya tsirkulyatsionnoy vody v prude-okhladitele // Patent RF №2541480, 13.02.2015.
8. Terent'ev N. N., Shimanskiy B. M. Eksploatatsiya vodokhranilishch-okhladiteley elektrostantsiy. M.: ORGRES, 1970.
9. Makarov I. I. Modelirovanie gidrotermicheskikh protsessov vodokhranilishch-okhladiteley TES i AES. M.: Energoatomizdat, 1986. 184 s.,
10. Metodicheskie ukazaniya po tekhnologicheskim raschetam vodoemov-okhladiteley, RD 153-34.2-21.144-2003, ОАО «VNIIG im. B. E. Vedeneeva». SPb., 2004. 55 s.

ОБ АВТОРАХ

Соловьев Александр Алексеевич, доктор физико-математических наук, профессор, академик РИА, заведующий научно-исследовательской лабораторией возобновляемых источников энергии, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, географический факультет, E-mail:a.soloviev@geogr.msu.ru

Solovyev Alexander Alekseyevich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor, academician of the RIA, Head of the research laboratory of Renewable energy sources of M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 119991, Moscow, Lenin Hills, d. 1, e-mail: a.soloviev@geogr.msu.ru

Залиханов Алим Михайлович, кандидат географических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, географический факультет, E-mail: bulungu@yandex.ru

Zalikhonov Alim Mikhailovich, Candidate of Geographical Sciences, Senior Researcher of research laboratory of Renewable energy sources of M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 119991, Moscow, Lenin Hills, 1, e-mail: bulungu@yandex.ru

Соловьев Дмитрий Александрович, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН), 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2, E-mail: solovev@guies.ru

Solovyev Dmitry Alexandrovich, Candidate of Physics and Mathematics Sciences, Senior Researcher of the Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences (RAS JIHT), 125412, Moscow, Izhorskaya, 13/2, e-mail: solovev@guies.ru

Шилова Любовь Андреевна, кандидат технических наук, доцент кафедры Информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», 129337, Москва, Ярославское ш., д.26, 499-188-14-19, E-mail: ShilovaLA@mgsu.ru

Shilova Liubov Andreevna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Information Systems, Technology and Automation in construction department of Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 129337, Moscow, Yaroslavskoye sh., 26, tel. +7-499-188-14-19, ShilovaLA@mgsu.ru

СИФОННЫЕ ВОДОЗАБОРНЫЕ СООРУЖЕНИЯ В ВОДОЕМАХ-ОХЛАДИТЕЛЯХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

А. А. Соловьев, А. М. Залиханов, Д. А. Соловьев, Л. А. Шилова

В статье рассматривается актуальная задача современной энергетики, посвященная установлению оптимальному использованию процессов тепло-массообмена в водоемах для достижения эффективного режима охлаждения потоков оборотной воды, поступающих из градирен электростанций.

Проведен анализ условий понижения температуры, выходящей из водоема воды с использованием щелевого водозаборника, работающего по принципу гидравлического сифона.

Предложена техническая реализация щелевого водозаборника.

Проведено экспериментальное моделирование и выполнены численные расчеты влияния расхода на глубину охлаждения оборотной воды в бассейне с щелевым водозаборником.

В заключении содержится вывод об эффективности использования гидротехнических щелевых водозаборников в системах охлаждения оборотной воды электростанций.

THE SIPHON WATER INTAKE FACILITIES IN COOLING POND OF ELECTRIC POWER PLANTS

A. A. Solovyev, A. M. Zalihanov, D. A. Solovev, L. A. Shilova

The actual problem of modern energy devoted to the establishment of the optimal use of processes of heat - mass transfer in water bodies in order to achieve an effective regime for cooling circulating water flow coming from the cooling towers of power plants is shown in the article. Also the analysis of lowering temperature conditions emerging from the water reservoir with water inlet slit, working on the principle of hydraulic siphon was held.

A technical realization of slot intakes is offered. A former experimental modeling and numerical calculations of the impact of consumption on the depth of the cooling circulating water in the pool with water inlet slit. Finally, there are conclusions about the effectiveness using of hydraulic slot intakes in the cooling systems of circulating water plants in the article.